

---

## PENGARUH PEMANASAN KERNEL $\text{UO}_2$ DALAM MEDIUM GAS ARGON TERHADAP SIFAT FISIS KERNEL $\text{UO}_2$ SINTER

Damunir, Sri Rinanti Susilowati, Ariyani Kusuma Dewi

Pusat Sains Dan Teknologi Akselerator - BATAN

Jl. Babarsari No.2, P.O. Box 6101 ykbb, Yogyakarta, Indonesia

e-mail: damunir1953@gmail.com

(Naskah diterima : 19-08-2015, Naskah direvisi: 18-09-2015, Naskah disetujui: 23-09-2015)

### ABSTRAK

**PENGARUH PEMANASAN KERNEL  $\text{UO}_2$  DALAM MEDIUM GAS ARGON TERHADAP SIFAT FISIS KERNEL  $\text{UO}_2$  SINTER.** Pengaruh pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  dalam medium gas argon terhadap sifat fisis kernel  $\text{UO}_2$  sinter telah dipelajari. Pemanasan dilakukan dalam reaktor sinter tipe bed. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh sifat fisis kernel  $\text{UO}_2$  sinter sesuai dengan persyaratan penggunaan sebagai bahan bakar nuklir. Sampel yang digunakan adalah kernel  $\text{UO}_2$  hasil reduksi pada 800 °C selama 3 jam yang mempunyai densitas sebesar 8,13 g/cm<sup>3</sup>; porositas sebesar 0,26; rasio O/U sebesar 2,05; diameter sebesar 1146 µm dan kebulatan sebesar 1,05. Sampel dimasukkan ke dalam reaktor sinter, lalu divakumkan untuk mengusir udara dan pengotor dalam reaktor. Setelah itu dialirkan air pendingin dan gas argon pada tekanan 5 mPa dengan kecepatan 1,5 liter/menit secara kontinyu. Temperatur reaktor dinaikkan dengan variasi pada 1200 – 1500 °C dan waktu divariasi selama 1 – 4 jam. Kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang dihasilkan, dianalisis sifat fisisnya meliputi densitas, porositas, diameter, kebulatan dan luas muka spesifik. Densitas dianalisis menggunakan piknometer dengan larutan  $\text{CCl}_4$ , porositas ditentukan menggunakan persamaan Haynes. Diameter dan kebulatan diamati menggunakan mikroskop Dino-lite. Luas muka spesifik ditentukan menggunakan *surface area meter* Nova-1000. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  dalam medium gas argon berpengaruh terhadap sifat fisis kernel  $\text{UO}_2$  sinter. Sifat fisis kernel  $\text{UO}_2$  relatif baik diperoleh pada temperatur pemanasan 1400 °C selama 2 jam dan dihasilkan kernel  $\text{UO}_2$  sinter dengan densitas sebesar 10,14 g/mL, porositas sebesar 7 %, diameter sebesar 893 µm, kebulatan sebesar 1,07 µm, luas muka spesifik sebesar 4,68 m<sup>2</sup>/g dan penyusutan padatan sebesar 22,08 %. Besaran sifat fisis ini hampir sama dengan sifat fisis kernel  $\text{UO}_2$  yang digunakan sebagai bahan bakar nuklir.

**Kata kunci:** Kernel  $\text{UO}_2$ , pemanasan, sifat fisis, densitas, porositas, luas muka spesifik dan kebulatan.

---

## ABSTRACT

**THE HEATING OF  $\text{UO}_2$  KERNELS IN ARGON GAS MEDIUM ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF SINTERED  $\text{UO}_2$  KERNELS.** *The heating of  $\text{UO}_2$  kernels in argon gas medium on the physical properties of sinter  $\text{UO}_2$  kernels was conducted. The heated of the  $\text{UO}_2$  kernels was conducted in a sinter reactor of a bed type. The sample used was the  $\text{UO}_2$  kernels resulted from the reduction results at 800 °C temperature for 3 hours that had the density of 8.13 g/cm<sup>3</sup>; porosity of 0.26; O/U ratio of 2.05; diameter of 1146 μm and sphericity of 1.05. The sample was put into a sinter reactor, then it was vacumed by flowing the argon gas at 180 mmHg pressure to drain the air from the reactor. After that, the cooling water and argon gas were continuously flowed with the pressure of 5 mPa with 1.5 liter/minutes velocity. The reactor temperature was increased and variated at 1200-1500 °C temperature and for 1-4 hours. The sinters  $\text{UO}_2$  kernels resulted from the study were analyzed in term of their physical properties including the density, porosity, diameter, sphericity, and specific surface area. The density was analyzed using pycnometer with  $\text{CCl}_4$  solution. The porosity was determined using Haynes equation. The diameters and sphericity were showed using the Dino-lite microscope. The specific surface area was determined using surface area meter Nova-1000. The obtained products showed tha the heating of  $\text{UO}_2$  kernel in argon gas medium were influenced on the physical properties of sinters  $\text{UO}_2$  kernel. The condition of best relatively at 1400 °C temperature and 2 hours time. The product resulted from the study was relatively at its best when heating was conducted at 1400 °C temperature and 2 hours time, produced sinters  $\text{UO}_2$  kernel with density of 10.14 gr/ml; porosity of 7 %; diameters of 893 μm; sphericity of 1.07 and specific surface area of 4.68 m<sup>2</sup>/g with solidify shrinkage of 22 %.*

**Keywords:**  *$\text{UO}_2$  kernel, heating, physical properties, density, porosity, specific surface area and sphericity.*

## PENDAHULUAN

Kernel oksida uranium dioksida ( $\text{UO}_2$ ) keramik untuk elemen bahan bakar reaktor temperatur tinggi berbentuk bola (*pebble*) dapat dibuat melalui proses sintering. Proses sintering adalah proses pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  pada temperatur tinggi yang mendekati titik leleh  $\text{UO}_2$ . Proses pemanasan dilakukan di lingkungan gas *inert* seperti gas hidrogen ( $\text{H}_2$ ), gas argon (Ar) atau campurannya menggunakan tungku pemanas reaktor tipe bed. Pada pemanasan ini terjadi penguapan dan pelepasan senyawa kimia dalam butiran kernel  $\text{UO}_2$  kemudian penyusutan sambil membentuk ikatan atom-atom yang lebih kuat dengan menghasilkan kernel  $\text{UO}_2$  sinter<sup>[1,2]</sup>.

Pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  dalam medium campuran gas  $\text{H}_2$  dan Ar pada temperatur tinggi (1600 - 1700 °C) dapat menghasilkan kernel  $\text{UO}_2$  sinter berderajat nuklir yang mempunyai densitas lebih besar, > 95 DT dan dimensi padatan dan porositas lebih kecil tetapi kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang dihasilkan tidak stokiometris. Hal ini dikarenakan terjadi reaksi antara molekul  $\text{UO}_2$  dengan  $\text{H}_2$  menghasilkan beberapa struktur molekul uranium oksida seperti kernel  $\text{UO}_2$  sinter stokiometris dengan rasio  $\text{O/U} = 2$ , kernel  $\text{UO}_2$  sinter hipostokiometris dengan rasio  $\text{O/U} < 2$  dan kernel  $\text{UO}_2$  sinter hiperstokiometris dengan rasio  $\text{O/2} > 2$ <sup>[3,4]</sup>.

Pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  dalam medium gas argon pada temperatur 1100-1600 °C terjadi penyusutan pori-pori kemudian perubahan dimensi diameter, kebulatan dan luas muka menjadi lebih kecil. Kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang dihasilkan mempunyai densitas lebih besar > 95 DT, diameter butiran, porositas dan luas muka butiran lebih kecil. Gas argon yang digunakan dalam pemanasan harus mempunyai kemurnian tinggi dan tidak boleh mengandung zat oksidator seperti gas  $\text{O}_2$  karena dapat mengoksidasi molekul  $\text{UO}_2$  menjadi molekul  $\text{U}_3\text{O}_8$  sehingga dapat

menurunkan kualitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter. Menurut Abdel Halim, A.S., Afifi, Y.K., El-Adham, K.A.(1987), pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  medium gas argon pada 1100 °C selama 2 jam dapat menghasilkan kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang mempunyai densitas > 95 % DT dan luas muka spesifik 10-12 m<sup>2</sup>/g<sup>[5,6]</sup>.

Pada tahun 2010<sup>[7]</sup> Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA) - BATAN Yogyakarta telah merancang reaktor tipe bed. Reaktor ini beroperasi pada 1500 °C sehingga dapat digunakan sebagai tungku pemanasan (*sintering*) kernel  $\text{UO}_2$  untuk menghasilkan kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang baik. Permasalahannya adalah reaktor sinter tersebut belum digunakan oleh peneliti sebelumnya untuk pembuatan kernel  $\text{UO}_2$  sinter karena proses vakumnya yang belum sempurna. Apabila menggunakan medium gas  $\text{H}_2$  atau campuran gas  $\text{H}_2$  dan argon akan terjadi kebocoran, gas  $\text{H}_2$  yang keluar dari reaktor akan bereaksi dengan gas  $\text{O}_2$  dari udara sehingga dapat menimbulkan bahaya seperti ledakan atau kebakaran. Pada penelitian ini akan digunakan gas argon sebagai medium pada proses pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  yang menggunakan reaktor sinter tersebut karena gas argon tidak bereaksi dengan gas  $\text{O}_2$  dan tidak menimbulkan bahaya jika terjadi kebocoran. Sampel yang digunakan adalah kernel  $\text{UO}_2$  hasil reduksi kernel  $\text{U}_3\text{O}_8$  dengan gas  $\text{H}_2$ . Kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang diperoleh dari proses pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  perlu dikarakterisasi sifat fisisnya meliputi densitas, diameter, kebulatan dan luas muka spesifik. Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui sifat fisis kernel  $\text{UO}_2$  sinter agar sesuai dengan persyaratan penggunaan sebagai bahan bakar nuklir. Hasil karakterisasi sifat fisis tersebut diharapkan dapat diperoleh kondisi relatif baik yang optimum pada setiap perubahan temperatur dan waktu pemanasan.

Temperatur pemanasan dapat mempengaruhi laju pemadatan (densifikasi) dan penyusutan pori-pori kernel  $\text{UO}_2$ . Prihastono<sup>[8]</sup>, menyatakan bahwa pemana-

san kernel  $\text{UO}_2$  dalam medium gas argon dapat dilakukan pada 1100-1600 °C. Proses ini mampu menghasilkan kernel  $\text{UO}_2$  sinter dengan densitas sebesar 95-98 % densitas kernel  $\text{UO}_2$  teoritis (DT), 10,96 g/mL, porositas sebesar 5 - 20 %, diameter antara 200 - 1000  $\mu\text{m}$  dan kebulatan < 1,1<sup>[9]</sup>. Pada temperatur lebih besar 1600 °C akan terjadi penerimaan panas cukup besar oleh kernel  $\text{UO}_2$  sehingga terjadi penutupan pori-pori butiran. Gas yang terperangkap didalamnya keluar dari dalam kernel  $\text{UO}_2$  dengan cara menembus dinding butiran sehingga dinding kernel  $\text{UO}_2$  menjadi retak atau pecah dengan membentuk pori-pori, sedangkan pada temperatur lebih rendah dari 1100 °C, terjadi pertumbuhan densifikasi padatnya menjadi lambat dan kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang dihasilkan mempunyai densitas lebih rendah dari densitas kernel  $\text{UO}_2$  teoritis.

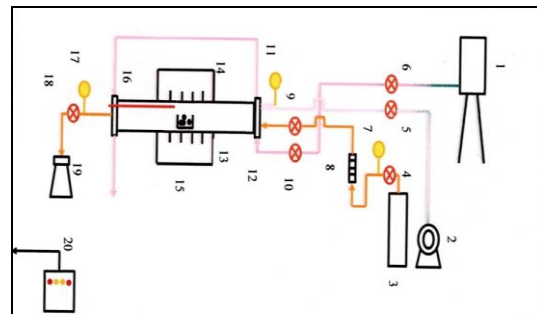
Parameter waktu sangat dibutuhkan pada pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  pada temperatur tinggi supaya terjadi penyusutan pori-pori dan peningkatan densifikasi kernel  $\text{UO}_2$ . Menurut Kuncoro, B<sup>[10]</sup>, waktu pemanasan berpengaruh terhadap kualitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang dihasilkan. Waktu pemanasan terlalu cepat akan menyebabkan terjadi keretakan dengan menghasilkan kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang mempunyai pori-pori lebih besar dan densitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang dihasilkan lebih rendah dari densitas kernel  $\text{UO}_2$  teoritis. Sementara itu, pada waktu pemanasan terlalu lama akan terjadi pembesaran volume padatan (*swelling*) dengan menghasilkan kernel  $\text{UO}_2$  sinter dengan densitas juga lebih rendah dari densitas kernel  $\text{UO}_2$  teoritis.

Karakterisasi sifat fisis yang meliputi densitas, diameter, kebulatan dan luas muka spesifik dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa peralatan. Densitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter dianalisis menggunakan piknometer dengan larutan  $\text{CCl}_4$ . Diameter dan kebulatan diamati menggunakan mikroskop optik Dino-Lite, luas muka spesifik ditentukan menggunakan alat *surface*

*areameter* dan porositas ditentukan dengan metode Haynes Mikail<sup>[11]</sup>.

## METODOLOGI

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah kernel  $\text{UO}_2$  hasil reduksi kernel  $\text{U}_3\text{O}_8$  pada temperatur 800 °C selama 3 jam yang mempunyai densitas 8,13 g/mL, porositas 0,26, diameter 1146  $\mu\text{m}$  dan kebulatan 1,05. Kernel  $\text{UO}_2$  tersebut selanjutnya dipisahkan antara berbentuk bulat dengan yang tidak bulat menggunakan alat getar dengan kemiringan 20°. Setelah itu dipilih butiran berbentuk bulat yang tidak pecah, dan masing-masing sampel yang akan diproses disiapkan sebanyak 1,5 g.



Gambar 1. Proses pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  menggunakan reaktor sinter tipe bed.

Keterangan:

1. Air pendingin,
2. Pompa,
3. Tabung gas  $\text{N}_2$ ,
4. Volve tabung gas,
5. Volve saluran vakum,
6. Volve saluran air,
7. Monometer,
8. Flow meter,
9. Volve gas masuk,
10. Volve saluran air,
11. Monometer,
12. Penutup alat sintering,
13. Pipa aluminium (alat sintering),
14. Furnace,
15. Tempat sampel,
16. Termokopel,
17. Monometer,
18. Volve gas keluar,

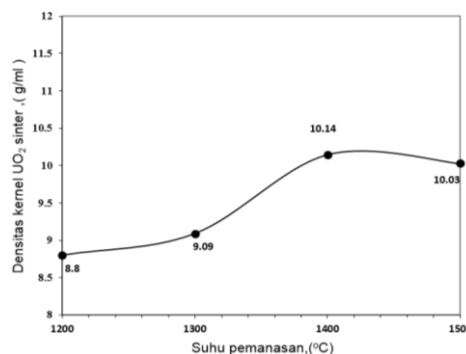
19. Benjana pembuangan gas, dan
20. Panel control.

Proses pemanasan dilakukan sesuai dengan kondisi proses yang diperoleh dari uji fungsi reaktor sinter yang telah dilakukan. Peralatan pemanasan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari seperangkat reaktor sinter tipe bed buatan Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA)-BATAN Yogyakarta seperti pada Gambar 1. Parameter operasi reaktor sinter yang digunakan adalah tekanan vakum sebesar 180 mmHg, laju alir gas argon yang digunakan sebesar 1-1,5 liter/menit, tekanan gas dalam reaktor sebesar 5 mPa, laju kenaikan temperatur sebesar 10 °C/menit dan laju penurunan temperatur pendinginan sebesar 10 °C/menit. Proses pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  dalam medium gas argon dilakukan dengan variasi temperatur berturut-turut 1200 °C; 1300 °C; 1400 °C dan 1500 °C dan menggunakan waktu dengan variasi selama 1 jam; 2 jam; 3 jam dan 4 jam.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

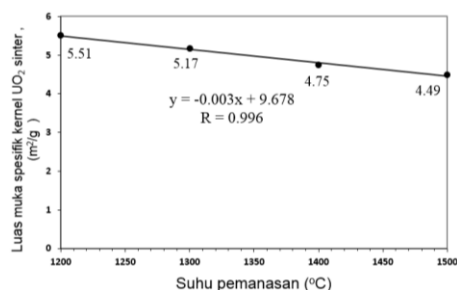
Gambar 2 menunjukkan bahwa perubahan densifikasi kernel  $\text{UO}_2$  pada temperatur 1200 – 1300 °C relatif kecil dengan laju perubahan densitas sebesar 0,29 g/mL. Hal ini terjadi karena panas yang diterima oleh kernel  $\text{UO}_2$  selama pemanasan sangat kecil dan tidak merata. Perubahan densifikasi (pemadatan) dari kernel  $\text{UO}_2$  pada temperatur 1400 °C relatif lebih baik apabila dibandingkan dengan hasil pemanasan pada temperatur lebih kecil atau lebih besar dari 1400 °C. Pada kondisi ini terjadi peningkatan densitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter dengan laju sebesar 1,05 g/mL hingga mencapai densitas maksimal sebesar 10,14 g/mL, karena panas yang diterima oleh kernel  $\text{UO}_2$  cukup besar dan merata. Pada temperatur 1500 °C panas yang diterima oleh kernel  $\text{UO}_2$  sangat besar sehingga terjadi pembesaran volume padatan (*swelling*) dan keretakan dengan

membentuk pori-pori (poros) seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Pada kondisi ini terjadi penurunan densitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter dengan laju sebesar 0,11 g/mL. Perubahan densitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter tersebut kecil sekali dan dapat diabaikan.



Gambar 2. Pengaruh temperatur pemanasan butiran  $\text{UO}_2$  selama 2 jam dalam medium gas argon terhadap densitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter

Hasil analisis luas muka kernel  $\text{UO}_2$  menggunakan alat *surface areameter* diperoleh hubungan antara temperatur pemanasan dengan luas muka spesifik kernel  $\text{UO}_2$  sinter seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Dari Gambar 3 terlihat bahwa hubungan antara temperatur pemanasan dengan luas muka spesifik mempunyai persamaan garis lurus  $y = -0,003x + 9,678$  dengan koefisien regresi  $R = 0,996$  dan tangensial negatif. Hal ini disebabkan oleh terjadinya pengecilan pori-pori kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang ditunjukkan dengan penurunan luas muka spesifik kernel  $\text{UO}_2$  sinter sebagai akibat kenaikan temperatur.



Gambar 3. Pengaruh temperatur pemanasan butiran  $\text{UO}_2$  terhadap luas muka spesifik kernel  $\text{UO}_2$  sinter

Perbedaan luas muka spesifik kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang dihasilkan dari temperatur 1200 °C sampai temperatur 1500 °C sangat kecil sehingga tidak tampak pada perubahan densitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter.

Tabel 1 menunjukkan hasil proses pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  pada temperatur 1200 °C, 1300 °C dan 1400 °C selama 2 jam terjadi penurunan porositas, diameter dan penyusutan kernel  $\text{UO}_2$  sinter secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa panas yang diterima oleh kernel  $\text{UO}_2$  mampu meningkatkan proses densifikasi padatan. Pada temperatur 1500 °C jumlah panas yang diterima oleh kernel  $\text{UO}_2$  cukup besar sehingga menyebabkan pembesaran volume padatan. Terjadinya kenaikan

porositas kernel  $\text{UO}_2$  dan diameter kernel  $\text{UO}_2$  sinter diikuti penurunan penyusutan butiran yang signifikan, tetapi temperatur pemanasan pada 1500 °C tidak merubah kebulatan (*sferisitas*) kernel  $\text{UO}_2$ , hal ini ditunjukkan oleh deviasi standar relatif sebesar 1,19 %. Fenomena ini disebabkan karena kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang dianalisis adalah butiran yang bulat dan hasil pemisahan butiran dilakukan dengan menggunakan alat ayakan dengan getar elektrik, selanjutnya besar porositas kernel  $\text{UO}_2$  sinter ditentukan dengan metode Haynes menggunakan persamaan:

$$\pi = (DT - Da) / (DT) \times 100 \%,$$

DT = densitas teoritis, dan

Da = densitas hasil analisis<sup>[11]</sup>.

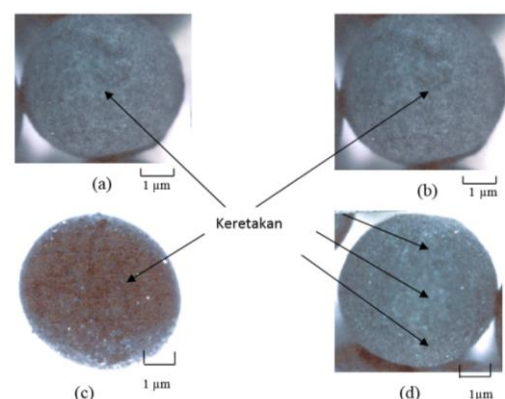
Tabel 1. Pengaruh temperatur pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  terhadap porositas, diameter, kebulatan dan penyusutan kernel  $\text{UO}_2$  sinter

Temperatur (°C)	Porositas kernel $\text{UO}_2$ sinter (%)	Diameter kernel $\text{UO}_2$ ( $\mu\text{m}$ )		Kebulatan kernel $\text{UO}_2$ sinter	Penyusutan kernel $\text{UO}_2$ sinter (%)
		Umpan	Sinter		
1200	20	1146	1029	1,04	10,21
1300	17	1146	980	1,06	14,48
1400	7	1146	893	1,07	22,08
1500	8	1146	951	1,06	17,02

Gambar 4 menunjukkan bahwa bentuk butiran kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pengamatan dengan mikroskop Dino-Lite pada pembesaran 50 kali. Kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pemanasan pada temperatur 1200 °C dan 1300 °C selama 2 jam masing-masing ditunjukkan pada Gambar 4.a dan 4b.

Kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pemanasan berbentuk relatif bulat dan terdapat serpihan dipermukaan butiran. Hal ini disebabkan karena panas yang diterima selama pemanasan relatif kecil sehingga laju perubahan densifikasi dan penyusutan pori-pori butiran sangat lambat. Bentuk kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pemanasan pada temperatur 1400 °C selama 2 jam ditunjukkan pada Gambar 4c, terlihat kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pemanasan mempunyai bentuk bulat dan terdapat sedikit serpihan di permukaan butiran. Hal ini dikarenakan laju perubahan

densifikasi kernel  $\text{UO}_2$  pada temperatur 1400 °C relatif lebih baik dari hasil pemanasan pada temperatur lebih kecil atau lebih besar dari 1400 °C.



Gambar 4. Bentuk kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  dalam medium gas argon selama 2 jam.

Keterangan:

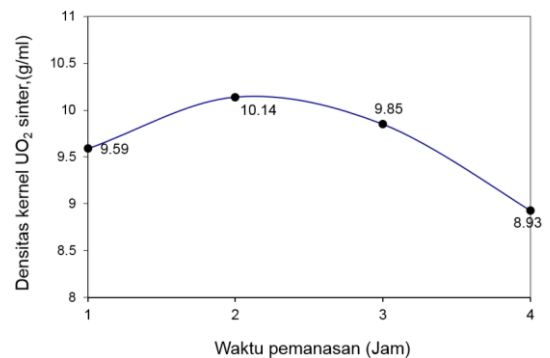
- a : Kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil sintering 1200 °C selama 2 jam
- b : Kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil sintering 1300 °C selama 2 jam
- c : Kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil sintering 1400 °C selama 2 jam
- d : Kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil sintering 1500 °C selama 2 jam

Bentuk kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pemanasan pada temperatur 1500 °C ditunjukkan pada Gambar 4d. Bentuk kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pemanasan relatif bulat dan terdapat serbihan cukup banyak karena panas yang diterima oleh kernel  $\text{UO}_2$  sangat besar sehingga terjadi pembesaran volume padatan (*swelling*) dan keretakan pada permukaan butiran.

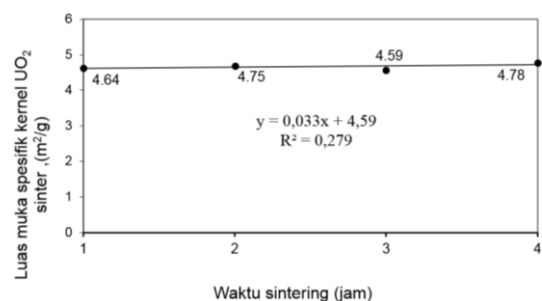
Dari variasi hasil pemanasan terhadap kernel  $\text{UO}_2$  diperoleh kondisi kernel  $\text{UO}_2$  relatif baik adalah pada kondisi pemanasan dengan temperatur 1400 °C. Pada kondisi ini dihasilkan kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang mempunyai porositas dan diameter kernel  $\text{UO}_2$  sinter paling kecil dan penyusutan paling besar. Hasil analisis sifat fisis ini hampir sama dengan sifat fisis kernel  $\text{UO}_2$  yang digunakan sebagai bahan bakar nuklir yaitu porositas antara 5 % sampai 20 %, diameter antara 200-1000  $\mu\text{m}$  dan kebulatan  $< 1,1^{[9]}$ .

Gambar 5 menunjukkan bahwa densitas kernel  $\text{UO}_2$  yang diperoleh dari hasil pemanasan pada temperatur 1400 °C dalam medium gas argon selama 1 jam relatif kecil karena panas yang diterima oleh kernel  $\text{UO}_2$  lebih kecil dan tidak merata, sehingga menyebabkan pertumbuhan densifikasi menjadi lambat. Densitas kernel  $\text{UO}_2$  yang diperoleh dari hasil pemanasan pada temperatur 1400 °C selama 2 jam relatif lebih baik dari hasil pemanasan lebih kecil atau lebih besar dari 2 jam. Pada kondisi ini terjadi peningkatan densitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter dengan laju sebesar 0,45 g/mL hingga mencapai densitas maksimal sebesar 10,14 g/mL. Hal ini terjadi karena panas yang diterima oleh kernel  $\text{UO}_2$  cukup besar, sehingga laju pertumbuhan

densifikasi dan penyusutan pori-pori butiran cukup besar dan merata. Sementara itu, densitas kernel  $\text{UO}_2$  yang diperoleh dari hasil pemanasan selama 3 jam hingga 4 jam terjadi penurunan densitas secara signifikan dengan laju penurunan sebesar 0,19 g/mL hingga 0,92 g/mL. Kondisi ini dikarenakan panas yang diterima oleh kernel  $\text{UO}_2$  sangat besar sehingga terjadi pembesaran volume dengan membentuk pori-pori (poros) lebih besar dibandingkan dengan pori-pori kernel  $\text{UO}_2$  yang terbentuk selama 2 jam.



Gambar 5. Pengaruh waktu pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  pada temperatur 1400 °C terhadap densitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter.



Gambar 6. Pengaruh waktu pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  terhadap luas muka spesifik kernel  $\text{UO}_2$  sinter.

Hubungan antara waktu pemanasan dengan luas muka spesifik kernel  $\text{UO}_2$  sinter ditunjukkan pada Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan pendekatan berupa garis lurus dengan persamaan  $y = 0,033x + 4,59$  dan koefisien regresi  $R = 0,528$  dengan besaran tangensial positif. Hal ini dikarenakan adanya sedikit pembesaran pori-pori kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang ditunjukkan oleh perubahan luas muka spesifik kernel  $\text{UO}_2$  sinter sebagai akibat kenaikan waktu pemanasan pada

temperatur yang sama. Perbedaan luas muka spesifik kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang dihasilkan dari waktu pemanasan selama 1 jam hingga 4 jam relatif kecil dibandingkan dengan perubahan luas muka spesifik kernel  $\text{UO}_2$  hasil pemanasan pada setiap perubahan temperatur diatas. Perubahan luas muka spesifik tersebut juga tidak tampak pada perubahan densitas kernel  $\text{UO}_2$  sinter.

Hasil proses pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  pada temperatur 1400 °C selama 1; 2; 3 dan 4 jam ditunjukkan pada Tabel 2. Pada proses pemanasan tersebut terjadi perubahan porositas, diameter, kebulatan dan penyusutan kernel  $\text{UO}_2$  sinter secara signifikan. Kernel  $\text{UO}_2$  sinter mengalami penurunan porositas pada temperatur pemanasan 1400 °C selama 2 jam apabila dibandingkan dengan pemanasan selama 1 jam. Hal ini diikuti penurunan diameter kernel  $\text{UO}_2$  sinter dari 975  $\mu\text{m}$  menjadi 893

$\mu\text{m}$  dan mengalami kenaikan penyusutan butiran dari 14,92 % hingga mencapai 22,08 %. Hasil kernel  $\text{UO}_2$  sinter pada pemanasan selama 3 jam hingga 4 jam mengalami kenaikan porositas dan diameter butiran yang terjadi sangat signifikan bahkan bila dibandingkan dengan porositas kernel  $\text{UO}_2$  yang dilakukan pemanasan pada temperatur 1400 °C selama 2 jam. Perubahan diameter kernel  $\text{UO}_2$  tidak signifikan, demikian juga dengan proses penyusutan kernel  $\text{UO}_2$ . Sebaliknya waktu pemanasan juga tidak merubah kebulatan (*sphericity*) kernel  $\text{UO}_2$ , hal ini ditunjukkan dengan besaran deviasi standar relatif yang diperoleh sebesar 1,97 %. Fenomena ini dikarenakan kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang dianalisis adalah butiran yang bulat dan merupakan hasil pemisahan dengan menggunakan alat dengan cara yang sama seperti diatas.

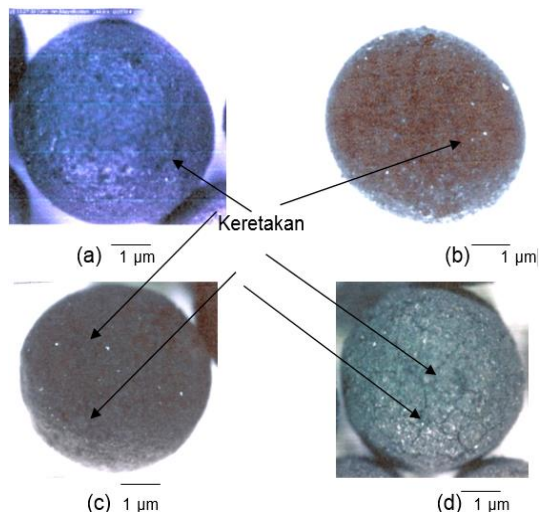
Tabel 2. Pengaruh waktu pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  terhadap luas muka spesifik, porositas, diameter, kebulatan dan penyusutan kernel  $\text{UO}_2$  sinter.

Waktu (Jam)	Porositas Kernel $\text{UO}_2$ sinter (%)	Diameter kernel $\text{UO}_2$ ( $\mu\text{m}$ )		Kebulatan kernel $\text{UO}_2$ sinter	Penyusutan kernel $\text{UO}_2$ sinter (%)
		Umpan	Sinter		
1	13	1146	975	1,03	14,92
2	7	1146	893	1,07	22,08
3	10	1146	954	1,03	16,73
4	18	1146	951	1,06	17,02

Gambar 7 menunjukkan bahwa bentuk butiran kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang merupakan hasil pengamatan dengan mikroskop Dino-Lite pada pembesaran 50 kali. Kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pemanasan pada temperatur 1400 °C selama 1 jam ditunjukkan pada Gambar 7a. Terlihat jelas butiran kernel  $\text{UO}_2$  sinter berbentuk relatif bulat dan terdapat serpihan di permukaan butiran, karena panas yang diterima selama pemanasan relatif kecil sehingga laju perubahan densifikasi dan penyusutan pori-pori butiran lambat. Bentuk kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pemanasan selama 2 jam ditunjukkan pada Gambar 7b. Kernel  $\text{UO}_2$  hasil sinter

mempunyai bentuk bulat dan terdapat sedikit serpihan di permukaan butiran. Hal ini dikarenakan laju perubahan densifikasi kernel  $\text{UO}_2$  relatif lebih baik dari hasil pemanasan pada waktu lebih kecil atau lebih besar dari 2 jam. Bentuk kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pemanasan pada temperatur 1400 °C selama 3 jam dan 4 jam ditunjukkan pada Gambar 7c dan 7d. Kernel  $\text{UO}_2$  sinter diperoleh berbentuk relatif bulat dan terdapat serpihan cukup banyak karena panas yang diterima oleh kernel  $\text{UO}_2$  sangat besar sehingga terjadi pembesaran volume padatan (*swelling*) dan keretakan pada permukaan butiran.





Gambar 7. Bentuk butiran kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil pemanasan pada temperatur 1400 °C selama 1- 4 jam.

Keterangan:

- a : Kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil sintering selama 1 jam pada temperatur 1400 °C
- b : Kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil sintering selama 2 jam pada temperatur 1400 °C
- c : Kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil sintering selama 3 jam pada temperatur 1400 °C
- d : Kernel  $\text{UO}_2$  sinter hasil sintering selama 4 jam pada temperatur 1400 °C

Kondisi waktu pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  relatif baik adalah selama 2 jam. Pada kondisi ini menghasilkan kernel  $\text{UO}_2$  sinter yang mempunyai porositas dan diameter kernel  $\text{UO}_2$  sinter paling kecil dan penyusutan paling besar.

## SIMPULAN

Temperatur pemanasan kernel  $\text{UO}_2$  dalam medium gas argon berpengaruh terhadap sifat fisis kernel  $\text{UO}_2$  sinter. Kondisi temperatur pemanasan relatif baik diperoleh pada 1400 °C dengan waktu pemanasan selama 2 jam. Parameter sifat fisis kernel  $\text{UO}_2$  sinter sebagai hasil pemanasan pada temperatur 1400 °C selama 2 jam diperoleh kernel  $\text{UO}_2$  sinter dengan densitas sebesar 10,14 g/mL, porositas sebesar 7 %, diameter sebesar 893 µm, kebulatan sebesar 1,07 µm, luas muka spesifik sebesar 4,68 m<sup>2</sup>/g dan penyusutan padatan sebesar 22,08 %. Besaran sifat fisis ini hampir sama dengan sifat fisis kernel  $\text{UO}_2$

yang digunakan sebagai bahan bakar nuklir yang mempunyai porositas antara 5 % sampai 20 %, diameter antara 200-1000 µm dan kebulatan < 1,1.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada saudara Moch. Qoyum, mahasiswa tugas akhir STTN-BATAN, Sudaryo, Moch. Setyadi, Triyono, Parimun, Saudari Fitrotun Alliyah (mahasiswa S-2 UGM) dan semua pihak yang telah banyak membantu sehingga makalah ini dapat diselesaikan, semoga terjalin kerjasama yang baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kang, S, (2005), *Sintering, Densification, Grain Growth, and Microstructure*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [2] Charollais.F, Fonquernie.S, Perrais.Ch, Peres.M, Celler. Fr, Harbonier, G, (2004), *CEA and Areva R&D HTR Fuel Fabrication & Presentation of the GAIA Experimental Manufacturing Line*, 2<sup>nd</sup> International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology Beijing, 1-11.
- [3] Han, J.K, W.K, Park, S.K. Kim, (1983), *The Sintering Behavior of The Hyper stoichiometric uranium dioxide in the Oxidative Atmosphere*. Journal of The Korean Society, 15.
- [4] Freitas, C. T, (1980), *Uraium Dioxide Sintering Kinetics and Mechanisms Under Controlled Oxygen Potentials*. Sao Paulo, Brasil: Institute De Energia Atomica.
- [5] Damunir, Setyadi. M, (2007), Aspek Kinetika Reaksi Kernel  $\text{U}_3\text{O}_8$  dengan Gas  $\text{H}_2$  terhadap Karakteristik Energi Aktivasi, Laju Reaksi dan Rasio O/U Kernel  $\text{UO}_2$ . Jurnal Teknologi Bahan Nuklir-BATAN, 3, 49-109.
- [6] Damunir, Setyadi. M, (2012), Karakteristik Indek *Sintering*, Mikrostruktur

- dan Morfologi Kernel *Sintering* Kernel  $\text{UO}_2$  secara Fluidisasi. Jurnal Teknologi Bahan Nuklir, Volume 8 (1), 1-66.
- [7] Setyadi, M., S. Atmojo, A. Triyono, (2010), Analisis Rancangan dan Pembuatan Reaktor Sinter Kernel  $\text{UO}_2$ . Jurnal IPTEK Nuklir Ganedra, 12, 37-45.
- [8] Prihastono. H, (2004), Pembuatan Kernel  $\text{U}_3\text{O}_8$  dengan Proses Gelasi Internal-Dehidrasi dalam Medium 2-Etilheksanol, Yogyakarta.
- [9] IAEA. (2010), *High Temperature Gas Cooled Reactor Fuel and Material*, International Atomic Energy, VIENNA, IAEA-TECDOC-1645, 10-30.
- [10] Kuncoro. B, (2006), Pengaruh Temperatur dan Waktu *Sintering* terhadap Kualitas Kernel  $\text{UO}_2$  dalam *Furnace* Jenis *Fluidized Bed*, Yogyakarta.
- [11] Qoyum. H, (2013), *Sintering* Kernel  $\text{UO}_2$  Hasil Reduksi dalam Medium Gas Argon Terhadap Sifat Fisis Kernel  $\text{UO}_2$  Sinter, Tugas akhir Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir, BATAN - Yogyakarta.
- [12] IUPAC, (1994), *Recommendations for The Characterization of Porous Solids*. Physical Chemistry Division Commission On Colloid And Surface Chemistry. International Union Of Pure And Applied Chemistry.
- [13] Rahaman. M, (2006), *Ceramic Processing and Sintering*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- [14] Sugondo, (2000), Analisis Pemadatan, Pengkerutan, dan Pertumbuhan Butir *Sintering*  $\text{UO}_2$ . Jurnal Daur bahan Bakar "URANIA".
- [15] Thridandapani R, (2010), *The Effect of Microwave Energy on Sintering*. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg, Virginia.
- [16] Xiao-dong, Y., G. Jia-cheng, W. Yong, (2008), *Low-Temperature Sintering Process for  $\text{UO}_2$  Pellets in Partially-oxidative Atmosphere*. Trans. Nonferrous Met. Soc. China.
- [17] Kim Yeoku., Jeong Kyung Chai., Oh Seung Chul., Cho Moonsung., Na Sang Ho., Lee Youn Woo., Chang Wha., (2005), *A Basic Study on Spherical  $\text{UO}_2$  Kernel Preparation using The Sol-Gel Method*, Journal of the Korean ceramic society, Vol 42, 9 , page 1-13.
- [18] Chai Jeong, K et al, (2007), *ADU compound Particle Preparation for HTGR Nuclear Fuel in Korea*, J. Ind.Eng. Cheme . Vol 13, No 5.
- [19] Damunir, (2010), Pengaruh konsentrasi PVA, Konsentrasi Uranium, pH Larutan Uranil Nitrat dan Waktu *Ageing* Larutan Sol Uranium Terhadap Viskositas Sol Uranium, Jurnal IPTEK Nuklir GANENDRA. ISSN 140-6957. Vol 3, No.1.
- [20] Kitamura N., Watarumi K., Sata K, (2003), *Nuclear fuel industries Ltd, Naka Ibaki Japan; Present status initial core fuel fabrication for HTR*, Article in IAEA-TECDOC-988: Vienna 373 -383.